

# 基于经济最优目标的温室环境控制策略<sup>\*</sup>

伍德林 毛罕平 李萍萍

**【摘要】** 将温室作物整个生长季节分为营养生长阶段和生殖生长阶段。在营养生长阶段,以温度优先为控制策略,即以温度为主控参数,根据温室内加温和降温的幅度等级来选择相应的执行机构,实现温室内作物栽培的环境参数控制要求。在作物生殖生长阶段,综合控制成本模型、温室环境的预测调控模型和作物生长模型,以温室产出与投入比最大为温室环境控制目标进行决策,为温室内作物生长提供经济适宜的环境参数和生长条件。以黄瓜为栽培对象,进行了温室周年生产。实践表明,按经济最优目标的控制策略来实现温室环境控制,既保证了作物正常生长的需要,又兼顾了经济成本。

**关键词:** 温室 环境 控制策略 经济最优化

**中图分类号:** S625.5<sup>+</sup>1;TP391.9

**文献标识码:** A

## Environmental Regulation Techniques Based on Economic Optimization in Greenhouse

Wu Delin Mao Hanping Li Pingping

(Jiangsu University)

### Abstract

The whole crop cultivation season was divided into two periods, namely vegetative stage to reproductive stage. In vegetative stage, the temperature was taken as a principal parameter, prior to other parameters in greenhouse. According to the corresponding magnitude rank of temperature rising or cooling, actuating mechanisms were carried out to meet control requirements. In reproductive stage, the control strategies were acted as economic optimized methods. Putting control cost models, predicted environmental parameters control model and the crop growth models in unite system to maximize the greenhouse input/output as control objective. So it could create favorable microclimate parameters and conditions to fit crop growth and development. And the system to cucumber round production was carried out. Practices showed that with the control system based on economic optimization strategies to manage crop growth and development, favorable control effects and lower cost were gained.

**Key words** Greenhouse, Environment, Regulation strategy, Economic optimization

### 引言

在温室作物生产管理系统中,环境控制的最佳策略已经成为非常关键的主题,实行优化控制策略的目标最终是寻求经济效益最大化<sup>[1]</sup>,在保证作物的产量与质量条件下,可以降低生产成本和相应的

环境负担。原则上,最佳的策略应该是实现基于经济收益的期望值、成本和风险等构成的目标函数达到最小值。不同的研究学者认为,考虑温室操作成本的情况下,对温室环境调控设备进行操作,必须有复杂的关于作物生理和环境物理方面的模型,这样可以改善环境控制的目标,从而为作物创造改善的环

收稿日期:2006-07-06

<sup>\*</sup> 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(项目编号:20040299004)、安徽省教育厅自然科学基金资助项目(项目编号:2003KJ127)和江苏大学博士创新基金资助项目

伍德林 江苏大学江苏省现代农业装备与技术重点实验室 博士生 讲师(安徽农业大学),212013 镇江市

毛罕平 江苏大学江苏省现代农业装备与技术重点实验室 教授 博士生导师 通讯作者

李萍萍 江苏大学江苏省现代农业装备与技术重点实验室 教授 博士生导师

境<sup>[2~4]</sup>。但对温室和作物两者来说,这种方法需要恰当的目标函数和优化的算法<sup>[5]</sup>。Henten<sup>[6]</sup>对温室栽培的莴苣(单个生长阶段)进行了经济分析,Ozkan<sup>[7]</sup>对温室蔬菜栽培过程中的能量消耗与平衡做出了相关分析。

应有效控制温室微环境气候,解决温室内作物全生育期内的环境优化问题,特别是对多生长阶段的作物。近年来,国内学者对温室微气候的控制尤其是温湿度动态模型的建立也进行了深入的研究<sup>[8~10]</sup>。研究温室作物系统的环境控制策略,开发基于作物模型使作物处于经济、适宜环境条件的智能化控制系统,是我国设施园艺进一步发展所面临的重要任务。

## 1 基本原理

通常将温室内种植的作物分为茄果类与叶菜类。对于叶菜类作物,由于只有单物候生长阶段即营养生长阶段,整个生长周期按照经济最优化的策略进行环境控制;对于茄果类作物,不同的生长物候阶段,作物的光合产物分配侧重的器官不一样,相应控制的目标也有所区别,但生长阶段分得过细,并不利于实际控制的实施。为了便于控制,将整个生长周期分为2个生长阶段,即营养生长和生殖生长阶段<sup>[11]</sup>。营养生长阶段,采用温度优先策略,以温度为主控参数,保证作物生长有适宜的环境,同时按照消耗能量多少对温室调控机构进行分级,根据温度变化幅值执行相应的调控机构,降低控制系统的成本和节约能源。生殖生长阶段,综合考虑作物的生长模型、温室调控机构(或设备)运行的控制成本模型和温室环境控制效果模型,按经济最优化的策略进行阶段调控,即在单位时间内,根据温室环境控制效果模型预测在控制运行下所达到的室内环境参数,以及各种可能的经济运行的控制成本,根据作物生长模型预测作物的预期经济产出,以产出投入比最大为控制目标,实现对温室环境参数的优化控制和控制决策。

## 2 模型建立

### 2.1 作物营养生长阶段

首先,将作物生长周期分为夏半年和冬半年,以长江以南地区为例,从4月中旬到10月中旬阶段定义为夏半年,其余时间段定义为冬半年。在温室的诸多环境因子中,温度和光照强度是最重要的两个参数,在目前的温室环境控制措施中,由于补光的成本太高,实际生产中只是进行遮光控制,而温度影响作物器官建构和最终的干物质量等一系列新陈代谢过

程,所以将温度设为温室内优先进行控制的参数。将实时的温度采样值与设定值的偏差 $E$ 分成9级,即 $\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$ ,其中中间状态0表示作物处于适宜的温度条件下,无需调控,对应的执行机构状态是天窗卷帘全打开,这也是该季节时段最多的一种状态。负号表示当前温度低于设定值,正号表示当前温度高于设定值,值越大,表示温度变化的幅度越大。按照消耗能量多少对温室各种调控机构进行分级,根据温室内加温和降温的幅度等级和偏差值来选择相应的执行机构,实现温室内作物栽培的环境参数控制要求。尽管温室环境变化的响应时间在温室环境经济最优的控制中并不是一个限制性因素<sup>[6]</sup>,但为了保证稳定的调控效果和防止设备超调,采样时间设为20 min。

$$E(n) = T_m - T_s \quad (1)$$

式中  $n$ ——采样数量  $T_s$ ——室内温度设定值  
 $T_m$ —— $n$ 次测量的室内温度平均值

### 2.2 作物生殖生长阶段

该阶段温室控制系统模型包括:作物生长模型、温室环境调控模型、温室环境调控的成本模型。通过对作物整个生长季节的控制并分阶段进行调控,结合维持温室运行的调控成本,以经济最优目标的控制策略满足作物工厂化生产的需要,提高现代温室生产的经济效益。

在试验数据的基础上,利用回归分析方法,温室内栽培作物的净光合速率与室内环境参数之间采用多项式的函数关系(基于目前温室内一般是通过通风来改变温室内 $\text{CO}_2$ 浓度,这里未考虑 $\text{CO}_2$ 的参数影响)来表达

$$P_n(T, H, L) = a_1 T^2 + a_2 H^2 + a_3 L^2 + b_1 TH + b_2 TL + b_3 HL + c_1 T + c_2 H + c_3 L + d \quad (2)$$

式中  $P_n$ ——取样植株的净光合速率,  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$   
 $T, H, L$ ——室内温度、相对湿度和光照强度  
 $a_k, b_k, c_k, d$ ——系数,由实验数据拟合,  $k=1, 2, 3$

作物叶、茎、根、果实的生长速率,采用光合作用产生的干物质按不同的比例在各器官中进行分配

$$x_{\text{organ}_i} = 0.682 P_n(T, H, L) f_{\text{organ}_i} \quad (3)$$

式中  $x_{\text{organ}_i}$ ——作物不同器官的生长速率,  $\text{g}/\text{d}$   
 $f_{\text{organ}_i}$ ——定植一定时间后干物质分配到各器官的比例,下标 $i$ 表示叶、茎、根和果实

0.682表示光合作用固定的 $\text{CO}_2$ 向碳水化合物的转换系数。

根据温室的湿热平衡、质量平衡等能量守恒方

程或实验结果,建立温室内各调控机构(或设备)单独作用以及不同的控制机构(或设备)组合的环境控制效果模型。这里仅给出温室降温情况下控制效果模型<sup>[12~13]</sup>(在本系统中,调控机构包括天窗、卷帘、遮阳网、风机、湿帘、喷淋和加热系统)。

$$\begin{cases} T_t = T_{t_0}(1 + U_T) - C_{Tj} \sum_{i=1}^n k_i F_{Ti} e^{\alpha_{Ti}(t-t_0)} \alpha_{Hi} \\ H_t = H_{t_0}(1 + U_H) - \\ \quad C_{Hj} \sum_{i=1}^m k_i F_{Hi} e^{\alpha_{Hi}(t-t_0)} + k_6 d_H e^{\alpha_{H6}(t-t_0)} \\ L_t = L_{t_0}(1 + U_L) - k_5 b L_{t_0} \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} U_T = a_{TT} \frac{T_t^0 - T_{t_0}^0}{T_{t_0}^0} + a_{TL} \frac{L_t^0 - L_{t_0}^0}{L_{t_0}^0} \\ U_H = a_{HH} \frac{H_t^0 - H_{t_0}^0}{H_{t_0}^0} + a_{HL} \frac{L_t^0 - L_{t_0}^0}{L_{t_0}^0} \\ U_L = a_{LL} \frac{L_t^0 - L_{t_0}^0}{L_{t_0}^0} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $T_t, T_{t_0}, T_t^0, T_{t_0}^0$ —— $t, t_0$  时刻温室内、外温度  
 $H_t, H_{t_0}, H_t^0, H_{t_0}^0$ —— $t, t_0$  时刻温室内、外相对湿度

$L_t, L_{t_0}, L_t^0, L_{t_0}^0$ —— $t, t_0$  时刻温室内、外光照强度

$\alpha_{Ti}, \alpha_{Hi}$ ——由实验数据确定的系数

$k_i$ ——各控制机构的状态,  $i$  为控制机构的编号,  $k_i=0$  为关,  $k_i=1$  为开

$k_5, k_6$ ——遮阳网和喷淋的状态

$b$ ——遮阳网的平均遮光率

$U_T, U_H, U_L$ ——不考虑控制机构状态影响时,外界气候的变化对温室内温度、相对湿度和光照的综合影响系数

$a_{ij}$ ——权重系数,反映室外因素  $j$  的变化对室内因素  $i$  的影响程度,由实验数据拟合得到

$F_{Ti}, F_{Hi}$ ——某一控制机构状态的变化及外界平均气候、室内起始环境因子对温室内温度、相对湿度的影响因子,参数值与温室结构、 $t \sim t_0$  时间段内外界平均气候和起始时刻室内环境因子有关,由实验数据拟合得到

$C_{Tj}, C_{Hj}$ ——各种控制机构的状态组合时对温度和相对湿度的综合修正系数,如果只有一种控制机构单独作用时则取值为 1,在调控机构

组合状态下,根据式(5)中求出的  $U_T, U_H$ ,由实验数据,从式(4)中反求得到修正系数的值

$J(K_i, t)$  为达到作物适宜的生长环境调控机构单独作用或者是不同的调控机构组合运行所消耗的成本,控制机构的调控成本模型计算式为

$$J(K_i, t) = \sum_{i=1}^{n_1} K_i P_i + \sum_{i=n_1}^{n_2} K_i P_i t_i \quad (6)$$

式中  $\sum_{i=1}^{n_1} K_i P_i$ —— $n_1$  个调控机构(开关量)运行的成本

$\sum_{i=n_1}^{n_2} K_i P_i t_i$ —— $n_2$  个调控机构(连续动作)运行时的成本

$P_i$ ——单个调控机构单位时间的运行成本

$K_i$ ——调控机构的开关状态

$t_i$ ——达到作物适宜的生长环境参数时,连续性调控机构实际运行的时间

在温室环境调控过程中,根据当前温室内的环境信息,选择调控机构单独作用或者不同的调控机构合理组合的方案,使得在该方案的调控下,温室内作物的产出值与温室环境调控所消耗的成本的比值达到最大,即达到“经济最优”的目标。表示为

$$\max(R_{\text{output-input}}) = \int_{t_0}^t \frac{\Delta x_{\text{organ}_j} P}{J(K_i, t)} dt \quad (7)$$

式中  $R$ ——产出投入比  $P$ ——市场价格

$\Delta x_{\text{organ}_j}$ ——在  $t_0$  到  $t$  时刻内作物器官的生长速率(这里选择果实)

图 1 给出了基于经济最优化目标的温室环境调

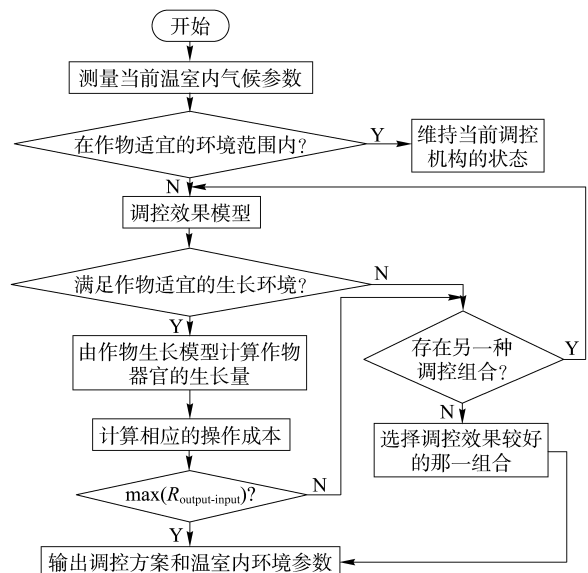


图 1 基于经济最优的温室环境控制流程图

Fig. 1 Schematic diagram based on economic optimization in greenhouse environmental control

控寻优的具体过程。

### 3 结果及分析

实验在江苏大学自行研制的 SR5.2 锯齿型塑料温室(南北栋)中进行。温室的结构参数为:屋脊高 5.2 m,檐高 3 m,单跨宽 6.5 m,长为 20 m,地面面积为 520 m<sup>2</sup>。温室有两组连续整体式的天窗,位于西边。温室内的气候参数由相应的传感器采集并记录,离温室 6 m 处有一简易的小气象站,记录室外的温度、湿度、光照强度和风速等。

黄瓜于 2002 年 4 月育于 72 孔的塑料穴盘内,长到 2~3 片真叶后开始移栽到温室内,实验一直持续到当年的 7 月。采用的基质是腐熟的芦苇末加 20% 的珍珠岩,黄瓜的水分、营养供应充分保证。黄瓜生长发育适宜的温度要求见表 1 所示<sup>[14]</sup>。

表 1 黄瓜各生长阶段对温度的要求

Tab. 1 Demands for temperature of the cucumber growth °C

生长阶段	最低温度	最适温度	最高温度
苗期(日/夜)	8	22~25/13~15	34
营养生长期(日/夜)	10~12	22~25/16~20	40/33
果实成熟期(日/夜)	15/14	23~28/15~20	30/20

每天 07:00 到 18:00,每隔 30 min 采集温度、相对湿度、光照强度、光合速率数据。在测量的数据中,对其中的 30 组数据进行拟合,黄瓜的光合速率与室内环境参数温度、光照强度之间的函数关系为

$$P_n = -45.973 + 3.409T + 2.919L - 0.06422T^2 - 0.09543L^2 + 0.02451TL \quad (8)$$

表 3 温室各种调控机构的可能组合的降温效果及相应的产投比

Tab. 3 Possible combination of control equipments to carry out cooling, corresponding effect and operation cost within 20 minutes

降温方案	温度/°C	相对湿度/%	光照强度/klx	净光合速率/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	成本/元	产投比
内喷淋+风机+内遮阳	32.4	75.3	9.98	24.576	1.46	16.83
内喷淋+内遮阳	34.7	79.7	9.98	23.120	0.85	27.20
内喷淋+风机+外遮阳	29.5	75.3	9.96	25.526	1.46	17.52
外喷淋+外遮阳	35.7	53.0	9.94	22.177	0.85	26.04
内喷淋+外遮阳	31.2	79.7	9.96	25.109	0.85	29.59
外遮阳+外喷淋+内喷淋+风机	27.9	79.8	8.84	22.823	2.34	9.75
内遮阳+内喷淋+外喷淋+风机	30.8	79.8	9.08	23.540	2.34	10.06

### 4 结束语

根据实际生产需要及环境调控的简单实用,作物整个生长周期被分为简单的两个阶段,即营养生长阶段和生殖生长阶段。在营养生长阶段,采取温度

式中  $T(^{\circ}\text{C})$ 、 $L(\text{klx})$  的取值范围为:  $8 \leq T \leq 40$ ,  $2 \leq L \leq 25$ 。

每隔 10 d 对植株的叶、茎、根和果实的生长量进行检测,并对长势良好的 3 株取平均值。在定植不同时期内,黄瓜光合作用产生的干物质在各器官中的分配比例的实验数据见表 2 所示。

表 2 黄瓜光合作用干物质在各器官中的分配比例

Tab. 2 Measured partitioning proportion for various organs of cucumber dry matter

定植时间/d	叶比例数	茎比例数	根比例数	果实比例数
10	0.487	0.282	0.231	0
20	0.420	0.487	0.043	0
30	0.628	0.294	0.078	0
40	0.582	0.362	0.048	0.018
50	0.350	0.200	0.023	0.427
60	0.283	0.175	0.015	0.527
70	0.278	0.161	0.012	0.539

以 7 月 21 日 14:00 为例说明决策过程。气候参数为:温度 39.0 °C,光照强度为 20.36 klx,相对湿度为 53.0%。根据黄瓜生长的条件,这表明温室内需要进行降温操作。温室内各种调控机构及不同的组合能达到的调控效果及相应的消耗成本,见表 3。按照经济最优的策略,选取内喷淋+外遮阳这种组合,对温室环境进行调控。经过 20 min 后,监测的室内参数为:温度为 31.5 °C,相对湿度为 79%,光照强度为 9.9 klx,达到这样的环境参数既能满足黄瓜生长发育的要求,同时又兼顾了经济成本。

优先的控制策略,减少能量消耗,降低调控机构的操作运行成本;而在作物的生殖生长阶段,通过有机结合作物生长模型、温室控制机构的调控效果模型和成本模型,实现经济最优目标的决策过程。从实际决策的实例来看,采用经济最优目标的策略来进行温

室环境调控,给出最佳的温室环境调控方案,既能保证经营者的利润。  
证作物适宜的生长环境条件要求,又能保证温室经

### 参 考 文 献

- 1 Stanghellini C, Jong T D. A model of humidity and its applications in a greenhouse[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 76(2): 129~148.
- 2 Jones J W, Dayan E, Keulen V H, et al. Modeling tomato growth for optimizing greenhouse temperature and carbon dioxide concentrations[J]. *Acta Horticulturae*, 1989, 248: 285~294.
- 3 Hashimoto Y. Computer integrated system for the cultivation process in agriculture and horticulture—approach to “intelligent plant factory” in the computerized greenhouse[M]. San Diego, Calif. Academic Press, 1993.
- 4 Ioslovich I, Seginer I. Approximate seasonal optimization of the greenhouse environment for a multi-state-variable tomato model[J]. *Transactions of the ASAE*, 1998, 41(4): 1 139~1 149.
- 5 Straten V G, Challa H, Buwalda F. Towards user accepted optimal control of greenhouse climate[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, 26(3): 221~238.
- 6 Henten V E J. Sensitivity analysis of an optimal control problem in greenhouse climate management[J]. *Biosystems Engineering*, 2003, 85(3): 355~364.
- 7 Ozkan B, Kurklu A, Akcaoz H. An input-output energy analysis in greenhouse vegetable production; a case study for Antalya region of Turkey[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2004, 26(1): 89~95.
- 8 朱伟兴,毛罕平,李萍萍,等. 遗传优化模糊控制在温室控制系统中的应用[J]. *农业机械学报*, 2002, 33(3): 76~79.
- 9 李惟毅,李兆力,雷海燕,等. 农业温室微气候研究综述与理论模型分析[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(5): 137~140.
- 10 胥芳,张立彬,陈教料,等. 玻璃温室小气候温湿度动态模型的建立与仿真[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(11): 102~105,131.
- 11 Seginer I, Ioslovich I. Seasonal optimization of the greenhouse environment for a simple two-stage crop growth model[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1998, 70(2): 145~155.
- 12 顾寄南,毛罕平. 温室环境智能化控制数学模型的研究[J]. *农业机械学报*, 2001, 32(6): 63~65.
- 13 顾寄南,毛罕平,李萍萍. 温室系统综合动态模型的研究[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(4): 79~82.
- 14 蔡象元. 现代蔬菜温室设施和管理[M]. 上海: 科学技术出版社, 2000.